Journal of Bio-Environment Control, Vol. 32, No. 2:106-114, April (2023)
DOI https://doi.org/10.12791/KSBEC.2023.32.2.106
pISSN 1229-4675
eISSN 2765-3641

비산 챔버를 활용한 차단 식물의 비산 저감 효과 분석

박진선[1] · 이세연[2] · 최락영[2] · 홍세운[3]*
[1]전남대학교 농업생명과학대학 기후변화대응농생명연구소 연구교수,
[2]전남대학교 농업생명과학대학 지역·바이오시스템공학과 & BK21기후지능형간척지농업교육연구팀 박사과정,
[3]전남대학교 농업생명과학대학 지역·바이오시스템공학과 BK21기후지능형간척지농업교육연구팀 부교수

Analysis of Effect on Pesticide Drift Reduction of Prevention Plants Using Spray Drift Tunnel

Jinseon Park[1], Se-Yeon Lee[2], Lak-Yeong Choi[2], and Se-woon Hong[3]*
[1]Research Professor, AgriBio Institute of Climate Change Management, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea
[2]Graduate Student, Department of Rural and Bio-systems Engineering; Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture (BK21 four), Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea
[3]Associate Professor, Department of Rural and Bio-systems Engineering; AgriBio Institute of Climate Change Management,; Education and Research Unit for Climate-Smart Reclaimed-Tideland Agriculture (BK21 four), Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

Abstract. With rising concerns about pesticide spray drift by aerial application, this study attempt to evaluate aerodynamic property and collection efficiency of spray drift according to the leaf area index (LAI) of crop for preventing undesirable pesticide contamination by the spray-drift tunnel experiment. The collection efficiency of the plant with 'Low' LAI was measured at 16.13% at a wind speed of 1 $m \cdot s^{-1}$. As the wind speed increased to 2 $m \cdot s^{-1}$, the collection efficiency of plant with the same LAI level increased 1.80 times higher to 29.06%. For the 'Medium' level LAI, the collection efficiency was 24.42% and 43.06% at wind speed of 1 $m \cdot s^{-1}$ and 2 $m \cdot s^{-1}$, respectively. For the 'High' level LAI, it also increased 1.24 times higher as the wind speed increased. The measured results indicated that the collection of spray droplets by leaves were increased with LAI and wind speed. This also implied that dense leaves would have more advantages for preventing the drift of airborne spray droplets. Aerodynamic properties also tended to increase as the LAI increased, and the regression analysis of quadric equation and power law equation showed high explanatory of 0.96 – 0.99.

Additional key words: aerial application, aerodynamic resistance, pesticide drift, Positive List System (PLS), prevention plants

서 론

우리나라의 농업 생산인구는 2000년 기준 약 403만 명에서 2019년 약 225만 명으로 연평균 3% 대의 감소 추세를 보였고, 2020년은 전년 대비 2.0% 감소한 220만 명으로 집계된 바 있다. 또한 농업 생산인구 중 고령화 인구 비율은 2019년 46.6%로 2000년 대비 연평균 1.3% 증가하였으며, 2020년 기준 48.1%로 조사되었다(KREI, 2021). 지속적인 농업인구의 감소와 고령화는 노동 집약적 특성을 갖는 농업에서 생산성 감소를 초래하고, 생산 비용 증가로 이어져 농업 경쟁력 약화를 불러왔다.

노동 집약적이던 농업 생산환경이 디지털 농업으로 전환하며 농업생산 과정 중 노동력 투입이 가장 집중되는 방제작업에 항공 방제의 도입이 활발해졌다(Jin 등, 2008). 드론과 같은 항공 방제기를 활용한 방제작업의 비율이 증가하여 항공방제가 이루어지는 농경지 면적은 2003년 201ha에서 2019년 194,000ha로 비약적인 증가 추세를 보였으며, 이는 전체 논 면적의 30%를 차지한다(KOSIS, 2022). 하지만 항공 방제기를 활용한 농약 살포는 많은 이점이 있으나, 분사된 약액이 목표 지점 이외로 비산되는 문제가 있다. 비산된 농약은 주변 농경지 및 주거지, 수자원에 퇴적되어 비의도적 농약오염을 유발하고, 이는 지역 주민의 건강 악화를 초래한다(Kim과 Hong, 2019). 비산은 농약의 살포 과정에서 농약액이 목적한

*Corresponding author: hsewoon@jnu.ac.kr
Received January 12, 2023; Revised February 28, 2023; Accepted March 13, 2023

작물 이외의 지점으로 이동하는 과정으로 주요 메커니즘은 자연 대류에 의한 공기의 이동으로 이루어진다(Hewitt 등, 2002). 또한 농약의 비산은 살포된 약액의 종류, 입경 크기와 같은 약액의 물리·화학적 성질과 풍향, 풍속, 온·습도와 같은 환경 영향 변수 및 항공 방제기의 성능, 노즐, 작업자의 작업 숙련도와 같은 작업 조건에 영향을 받는다(Wang 등, 2018).

한편 2019년 모든 작물에 대해 농약 허용기준 강화제도(Positive List System, PLS)가 시행되고, 잔류 농약에 대한 사회적 인식이 증가함에 따라 농약 살포 시 비산에 의한 비의도적 농약오염 위험성이 주요 사안으로 논의되고 있다. 살포된 농약의 약 50% 이상이 살포 지역을 벗어나 비산되는 것으로 알려져(Jensen과 Olesen, 2014), 목적한 농작물에 도달하지 못하는 농약이 인근 농경지에 최적 및 잔류하여 농업생산에 경제적 손실을 유발하고, 이로 인한 농민 간 법적 분쟁이 발생하는 등 농약 비산이 사회적 이슈로 대두되고 있다.

이에 따라 항공살포 농약의 비산 저감을 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 항공살포 농약의 비산은 기상요인에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으나(Park 등, 2021), 풍향 및 풍속, 온·습도와 같은 환경영향변수는 제어가 불가능한 요인으로 비산량 정량 평가를 위한 연구에서 반복 실험을 통한 결과 획득에 어려움이 있다. 반면, 항공살포에 의한 비산 발생의 또 다른 주요 원인으로 항공 방제기 및 살포 조건에 따른 비산량 평가를 꼽을 수 있으며, 이는 노즐의 종류, 분사 고도 및 입경 크기 조절 등 여러 변수의 제어가 가능해 상대적으로 분석이 용이하다.

항공 방제기의 살포 조건 중 노즐 선택에 따른 비산 저감 효과 규명을 위한 연구(Guler 등, 2007; Nuyttens 등, 2007; Ramsdale과 Messeersmith, 2017; Gregorio 등, 2019; Noh 등, 2020)로 풍동에서 외부 풍속을 제어한 상태에서 상용 노즐의 비산량 평가가 수행된 바 있다. 또한 입경 크기를 조절하여 비산 저감 효과를 주기 위해 분사압력(Creech 등, 2015) 및 분사 고도(Zheng 등, 2018; Tang 등, 2020)를 달리하여 약액 분사 후 비산량을 정량 평가하는 연구가 수행된 바 있다. 이와 같은 연구는 항공 방제기의 특성 및 살포 조건에 대한 연구로 입경 크기 및 제형의 변화를 주기 때문에 살포 효율 및 작물별 생육 특성에 따라 비산 저감 효과에 차이를 보일 수 있어 기체 및 살포 조건 이외의 포괄적인 비산 저감 방안의 마련이 요구된다.

살포 약액의 비산은 대상 작물의 크기, 작물의 식생 밀도, 잎의 형상 등 작물 식생 요인이 약액 살포 시 작물을 통과하는 비산 가능량과 관련이 있어 농약 비산과 귀결된다(Hong 등, 2021). 이에 따라 방풍림 설치와 같은 인공 구조물을 통해 비산 저감을 유도한 연구가 수행된 바 있고(De Schampheleire 등, 2009), 항공 방제 대상 필지 주변에 물리적 비산 저감 장치 마련을 위해 옥수수 식재 후 주변 재배 작물에 대하여 잔류 농약 검사를 수행하여 비산 저감 효과를 분석한 연구가 진행된 바 있다(Kim 등, 2022). 이는 살포 된 약액이 기상 및 항공 방제기 하향풍에 의해 비산될 때 주변 지역에 수목 및 기타 작물이 존재할 경우 비산 된 약액 입자가 작물에 충돌하거나 부착되어 비산 도달거리가 감소하는 차단 식물의 비산 저감 효과를 시사한다. 그러나 이와 같은 차단 식물의 비산 저감 효과는 식생 수준에 따른 식물 엽면적 및 공기 투과율에 따라 부착되는 약액의 양이 상이하기 때문에 비산 저감 효과 또한 일정치 않아, 이를 정량적으로 규명하기 위해서는 차단 식물의 식생 수준에 따른 평가가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 항공살포에 의한 약액의 비산 저감을 위해 차단 식물을 활용할 때, 식물의 식생 수준에 따른 잎의 약액 부착 효율 및 공기 투과 저항성 변화를 평가하고자 한다. 식물의 식생 수준을 정의하기 위한 변수로 엽면적지수(leaf area index)를 채택하여 세 수준으로 구분하며, 다양한 풍속 조건을 구현하기 위해 비산 풍동를 활용하여 반복 실험을 통한 정량 평가를 수행하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 엽면적지수 측정 방법

본 연구에서는 약액의 비산을 유발하는 주요 인자인 풍속과 식물 식생에 따른 비산 약액의 부착 특성을 평가하였고, 식물 식생 수준을 반영하기 위한 정량 지표로 엽면적지수(leaf area index, LAI)를 선정하였다.

LAI는 단위토양면적당 작물 군란의 엽면적 총합으로 나타내며, 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$LAI = A \times G^{-1} \quad (1)$$

여기서, A는 일정 시기의 군락의 엽면적 총합(m^2)이며, G는 단위토양면적(m^2)이다. LAI의 측정 및 산정 방법은 다양하나 본 연구에서는 실내 챔버를 활용한 약액 비산 실험 후 잎을 떼어 직접 엽면적을 산정하는 시험법을 채택하였다. 실험 후 떼어 낸 잎은 스캐닝 후 이미지 처리 프로그램인 Image J™(NIH, Bethesda, MD, USA)를 활용하여 엽면적을 산정하였다.

본 연구에서 비산 약액 부착 평가를 위해 활용한 식물은 물푸레나무과 광나무(*Ligustrum japonicum*)로 잎의 길이는 3 – 10cm, 너비 2.5 – 4.5cm이며, 잎의 두께가 두껍고 광택이 있는 상록 관목이다. 광나무는 전라남도 및 경상남도 지역에 주로 분포하고, 농경지 주변 지역에서도 흔히 볼 수 있는 농촌 지역의 보편적 수종이다. 또한 수집한 광나무 잎에 대하여

LAI의 변화를 모의하기 위해 Fig. 1과 같이 잎의 수를 달리하여 세 수준으로 나누어 실험을 수행하였다.

2. 비산 챔버 원리 및 제작

본 연구에서는 외부 환경 영향 변수를 제어하고, 풍속별 공기 중 비산을 모의하기 위해 실내에서 약액 분사 후 비산을 모의할 수 있는 비산 챔버(spray drift tunnel)를 Fig. 2와 같이 설계 및 제작하였다(Park 등, 2022).

비산 챔버 규격은 1500×1200×500mm의 약액 분사 구간과 1150×350×350mm의 풍동으로 이루어져 있다. 챔버 내 공기 유입을 위해 350×350mm 유입구를 설치하고, 챔버 내 공기 흐름을 유도하기 위해 가변식 팬을 설치하여 1방향 배기를 시행하였다. 바람을 형성하는 배기팬(SLF-300D, Sung Il E-B Corp.)은 3,568$m^3 \cdot h^{-1}$로 항공 방제 제한 풍속인 3$m \cdot s^{-1}$뿐만 아니라 다양한 풍속 환경에서 약액의 비산을 모의할 수 있도록 제작하였다.

Case	Leaf density		
	Low	Medium	High
1			
2			

Fig. 1. The objective plants by leaf density.

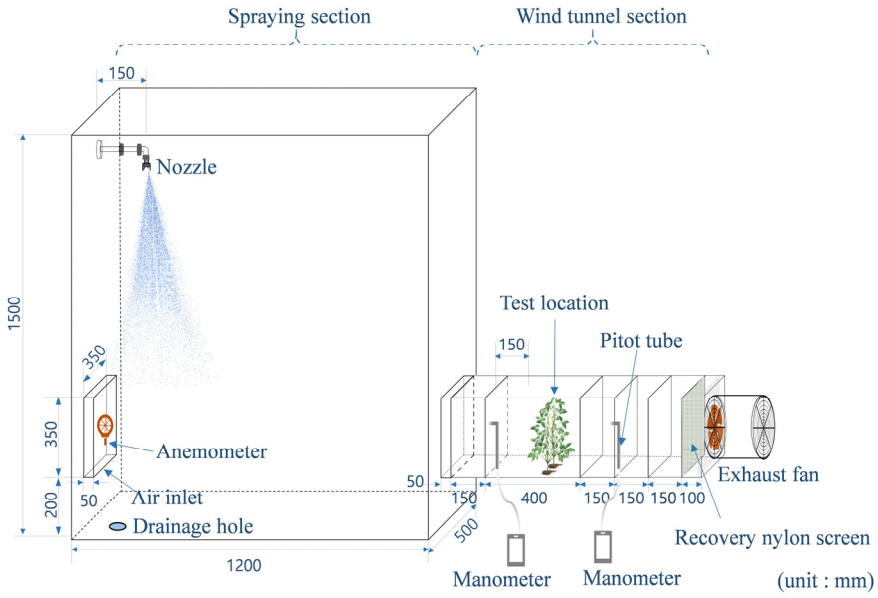


Fig. 2. Scheme of the wind tunnel test to evaluate drift amount by crops according to leaf area index (LAI).

비산 챔버는 분사 구간에 설치된 노즐을 통해 약액을 분사하고, 배기팬을 이용하여 내부 공기 순환을 유도한다. 이때 분사 구간에서 분사된 약액 중 입경이 큰 입자는 분사 구간 내 낙하하여 퇴적되고, 입경이 작은 약액 입자가 내부에 일정하게 불고 있는 공기 흐름에 따라 풍동으로 비산하게 된다. 풍동으로 비산 된 약액 중 내벽에 부딪치거나, 지면에 떨어진 약액은 근거리에 퇴적되거나, 인접 작물 또는 구조물에 부착되어 비산되지 않는 입자로 간주하여 비산량 측정 범주에서 제외하였다.

3. 비산 챔버를 활용한 LAI에 따른 식물 비산 특성 측정 방법

약액 분사는 상용 노즐인 XR11002(Teejet, Technologies, Springfield, IL, USA) 노즐을 이용하여 분사하였고, 분사압은 2.5 bar를 유지하였으며, 약액 분사는 10초간 진행하였다. 분사한 약액의 제형은 액상수화제((주)팜한농 제공)이며, 실내 실험을 위해 유효성분을 배제한 Blank formulation을 사용하였다.

풍동에 거치된 식물에 부착된 비산량 정량 평가는 총유기탄소(total organic carbon, TOC)를 측정하여 평가하였다(Park 등, 2021; Park 등, 2022). 풍동 전체에 걸쳐 비산된 약액의 총량은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 풍동 구간 내 거치된 나일론 스크린에 포집된 총량을 기준으로 하였으며, 실험 풍속에서 식물의 거치 없이 약액 분사 후 포집된 총량을 측정하였다.

TOC 측정에 영향을 미칠 수 있는 변수를 제거하기 위해 풍동 내 거치할 식물 표면에 먼지 및 기타 이물질은 3차 초순수를 사용해 세척 후 실험에 활용하였다. 식물의 배치는 풍동 구간 내 폭 0.1 m의 식물 거치 구간을 정하여 배치하였으며, 엽면적 밀도가 'Low' 수준에서 1열, 'Medium' 수준에서 2열, 'High' 수준에서 3열로 배치하였고, 식물의 잎과 가지 형상을 고려하여 잎이 최대한 겹치지 않도록 배치하였다.

분사 약액의 TOC 농도 및 1회 분사량은 사전 측정하였고, 풍동 구간으로 비산된 약액 양은 총 분사량에서 나일론 스크린을 통한 회수량의 차이로 산정하였다. 식물의 LAI에 따른 비산 약액 부착 효율은 총 분사량에서 식물에 포집된 약액의 농도 차이로 산정하였으며, 식물의 약액 부착량을 질량 단위로 환산하여 평가하였고, 총 분사량 중 작물 부착량의 비율을 산출하여 식물의 비산 약액 포집률을 정량 평가하였다.

4. 비산 챔버를 활용한 식물의 공기투과저항력 측정 방법

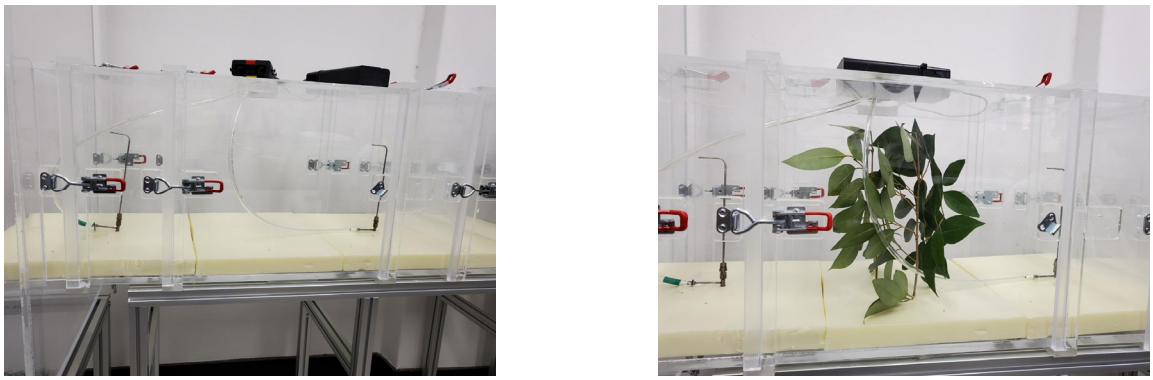
4.1 공기 투과 저항력 측정 기본 방정식

공기가 관 또는 터널을 통과할 때 내부 기류가 풍동 내 식물을 통과하게 되면 식물 통과 전, 후로 압력이 강하하게 된다. 압력 강하의 정도는 물체의 공기 투과성에 따라 그 정도가 달라질 수 있다. 이때 발생하게 되는 압력 차를 측정하면 물체에 따른 압력 손실을 추정할 수 있으며, 베르누이 방정식으로부터 식 (2)와 같이 에너지 흐름을 표현할 수 있다.

$$\frac{p_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}+z_1=\frac{p_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}+z_2+\int_{x_1}^{x_2}\frac{f}{D}\frac{v_{\overline{x_2-x_1}}^{\,2}}{2g}dx+\frac{S_p}{\rho g} \quad (2)$$

여기서, z는 위치수두(m)이고, p는 압력(Pa), v는 유속($m \cdot s^{-1}$), ρ는 공기의 밀도($kg \cdot m^{-3}$)를 의미한다. x_1과 x_2는 측정 물체 전.후의 위치(m)이며, D는 관 또는 터널의 직경(m)이다. f는 관 및 터널 벽면 마찰계수이고, S_p는 물체에 의한 압력 손실(Pa)이다. 본 연구에서 제작한 풍동은 수평 상태로 위치수두의 차이가 없었고, 유속 또한 동일하였다. 따라서 위 베르누이 방정식을 식 (3)과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$S_p=(p_1-p_2)-\rho g(f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g}) \quad (3)$$



(a) Measurement pressure without crop in wind tunnel (b) Measurement pressure after mount crop in wind tunnel

Fig. 3. Experiment of aerodynamic using wind tunnel.

여기서, L은 x_2와 x_1 사이의 거리(m)를 나타낸다. 또한 풍동 내 단면의 변화가 없기 때문에 압력 손실은 풍동 내부 벽면에서 발생하는 마찰에 의한 압력 손실과 같다.

4.2 풍동 내 벽면 마찰 손실 산정

공기 투과 저항력은 일정 풍압이 발생할 때 식물을 중심으로 전후의 압력을 측정하고, 그 차이를 이용하여 측정할 수 있다. 이때 풍동 내부에서 발생하는 벽면 마찰 손실이 발생하는데 식물 공기 투과 저항력을 평가하기 위해서는 이에 대한 정량적 고려가 필요하다. 벽면 마찰에 의한 압력 손실은 두 지점의 거리, 풍동의 폭, 평균 유속, 마찰계수에 의해 산정할 수 있다. 그러나 마찰계수를 추정할 때 고려할 변수가 많아 본 연구에서는 식물이 없는 상태($S_p = 0$)에서 Fig. 3(a)와 같이 두 지점의 압력 차를 측정하여 식 (4)와 같이 풍동 내 벽면에 의한 마찰 손실을 추정하였다.

$$p_1 - p_2 = \rho g(f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g}) \tag{4}$$

4.3 식물의 공기 투과 저항력 측정 방법

식물의 공기 투과 저항력 실험은 Fig. 3(b)와 같이 풍동 구간 내 발생하는 압력을 측정하기 위해 일정 간격을 두고 두 지점에 피토 튜브를 설치하여 풍동 내 압력을 측정하였다. 식물이 없는 상태 및 식물 배치 후 압력을 측정하여 그 차이를 평가한다. 압력은 정압과 동압의 합으로 얻어지며 동압은 내부에 바람이 일정한 속도로 불기 때문에 전 구간이 동일하여 정압을 측정해 작물의 공기 투과 저항력을 추정하였다. 공기 투과 저항력은 경험을 통한 상수를 도입하여 유속의 거듭제곱의 형태로 나타낼 수 있는데, 이를 멱법칙에 의한 계산으로 일컫는다.

$$\Delta p = -C_0|v|^{C_1} \tag{5}$$

여기서, C_0, C_1은 급수 형태의 방정식에 대한 계수를 의미한다. 또한 Darcy-Forchheimer가 제안한 식을 활용하여 나타낼 수 있다.

$$\Delta p = -(\frac{\mu}{\alpha}v + C_2\frac{1}{2}\rho v^2) \tag{6}$$

여기서, μ는 점성계수(kg·m^{-3}·s), ρ는 매질을 통과하는 유체의 밀도(kg·m^{-3}), α는 공기 투과성 상수, C_2는 내부 저항 인자 상수이다.

식물은 식생에 따른 변화를 고려하기 위해 LAI를 달리하여 배치하였다. 풍속은 1.0m·s^{-1}에서 2.5m·s^{-1}까지 설정하였고, 압력 측정 중에는 일정하게 불도록 풍속을 유지하였다.

결과 및 고찰

1. 엽면적지수 산정 결과

본 연구에서는 식물의 식생 수준에 따라 잎의 약액 부착 효율 및 공기 투과 저항성을 측정하기 위해 엽면적 밀도를 세 수준으로 구분하여 'Low', 'Medium', 'High'로 나타내었고, 이때 각 수준별 모든 잎에 대한 엽면적지수(LAI)를 산정하여 Table 1과 같이 제시하였다.

'Low' 수준의 LAI는 평균 1.723±0.130, 'Medium' 수준 2.810±0.412, 'High' 수준 4.875±0.701로 산정되었다.

2. 비산 챔버를 활용한 LAI에 따른 식물의 비산 약액 부착 효율 측정

실내 풍동을 활용한 식물의 LAI에 따른 비산 약액 부착 효율 측정 결과는 Table 2와 같이 산정되었다. 식물의 비산 약액 부착 효율은 LAI가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 식물이 동일 수준의 LAI를 가질 경우, 풍동 내 풍속이 빠를수록 식물의 비산 약액 부착 효율은 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 4(a)에서 풍속 1m·s^{-1}에서 LAI가 'Low' 수준일 때 부착 효율 16.13%로 측정되었고, 풍속 2 m·s^{-1}에서 동일 수준의 LAI를 가질 때 식물의 부착 효율은 29.06%로 측정되어 1.80배 증가한 것으로 나타났다. 'Medium' 수준에서는 풍속 조건

Table 1. LAI according to wind velocity and level of leaf density.

Case	Wind velocity (m·s^{-1})	Leaf density	Total leaf area (cm^2)	Leaf area index
	1	Low	529.966	1.631
1	1	Medium	818.511	2.518
	1	High	1,423.141	4.379
	2	Low	589.723	1.815
2	2	Medium	1,007.745	3.101
	2	High	1,745.308	5.370

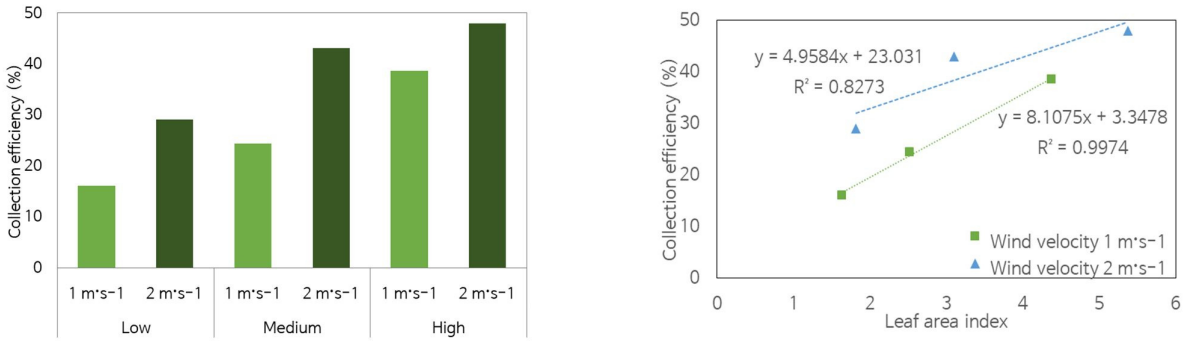
에 따라 24.42%에서 43.06%로 1.76배 증가하였다. 또한 LAI가 'High' 수준일 때 풍속의 변화에 따른 식물의 부착 효율은 1.24배 증가하는 것으로 나타나 풍속의 증가에 따라 식물의 약액 부착 효율도 함께 증가하는 경향을 보였다.

LAI에서 살펴보면 Fig. 4(b)와 같이 풍속 1m·s^{-1}에서 LAI가 'Low' 수준일 때 16.13%에서 'High' 수준일 때 38.64%로 2.40배 증가하였다. 풍속 2m·s^{-1}에서도 'Low' 수준일 때 29.06%에서 'High' 수준일 때 47.98%로 1.65배 증가하여 LAI가 증가할수록 LAI에 따른 식물의 약액 부착 효율은 특정 경향을 보였으며, 이를 Fig. 4(b)와 같이 도시하였다. 식물의 약액 부착 효율은 각 풍속 조건에서 모두 선형으로 증가하는 경향을 보였고, 풍속 1m·s^{-1}에서 결정계수 0.9974로 풍속 2m·s^{-1}보다 좀 더 큰 값을 보였다. 이는 풍속이 증가함에 따라 잎의 흔들리는 정도, 가지의 움직임 등 식물이 가지는 특성에 따른 것으로 판단된다.

본 연구의 결과 식물의 LAI의 증가에 따라 비산 약액의 부착 효율이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 항공 방제를 수행하는 농경지 주변에 LAI가 높은 식물이 분포하고 있는 경우 항공 방제에 의한 약액 비산 감소에 효과가 있음을 시사한다. 항공 방제기를 활용한 약액 살포 시 약액 비산을 유발하는 요인은 외부의 풍향 및 풍속이며, 외부 풍속이 없는 상태라 하더라도 항공 방제기의 작동 원리에 따라 필연적으로 하향풍이 발생한다. 이때 주행경로에 따라 농경지 내부에서 살포된 농약은 해당 농경지에 퇴적되거나, 농작물에 부착되어 비산될 가능성이 감소하지만, 농경지 경계에서 살포된 약액은 하향풍에 의해 인접 농경지에 영향을 미칠 우려가 크다(RDA, 2020). 따라서 농경지 경계에 비산을 차단할 목적으로 콩, 깻잎, 옥수수와 같은 작물을 식재하여 경계에서 발생할 수 있는 비산 약액을 지면에 퇴적되도록 유도하거나 비산 차단 식물에 약액이 부착될 경우 비산량 감소로 이어질 수 있다. 이에 따라 항공살포에 의한 약액 비산을 차단할 목적으로 농경지 경계에 LAI 및 밀도를 확보할 수 있는 작물 식재가 효과적인 비산 저감 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 비산 챔버를 활용한 식물의 공기 투과 저항성 측정

비산 챔버를 활용하여 식물의 LAI 및 내부 풍속 조건에 따라 공기 투과 저항성을 측정하였다. 비산 챔버에서 차단 식물을 거치한 풍동 구간 내부의 벽면 마찰에 의한 압력 손실은 작물을 거치하지 않은 상태로 내부 압력 차를 측정하였고, 이때 풍속이 증가하더라도 압력 차가 0에 근접하게 측정되어 풍동



(a) Collection efficiency by wind velocity and leaf density

(b) Tendency of drift collection efficiency by LAI

Fig. 4. Measurement of drift collection efficiency by wind velocity and leaf area index (LAI) in wind tunnel.

Table 2. Collection efficiency and drift amount according to leaf density and wind velocity.

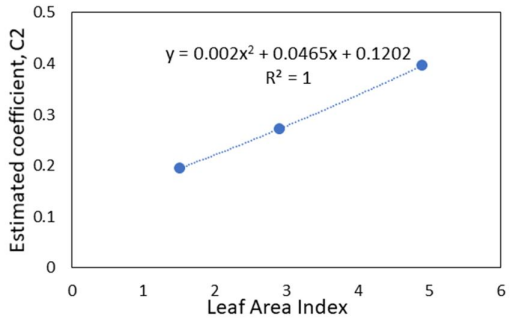
Wind velocity (m·s^{-1})	Leaf density	Total drift amount		Collection amount by leaves		Collection Efficiency (%)
		TOC* (mg·L^{-1})	liquid (mL)	TOC (mg·L^{-1})	liquid (mL)	
1	Low	16.17	5.1934	0.652	0.8376	16.13
	Medium	16.17	5.1934	0.987	1.2680	24.42
	High	16.17	5.1934	1.562	2.0067	38.64
2	Low	29.44	9.4554	2.139	2.7480	29.06
	Medium	29.44	9.4554	3.169	4.0712	43.06
	High	29.44	9.4554	3.531	4.5363	47.98

*TOC: Total organic carbon

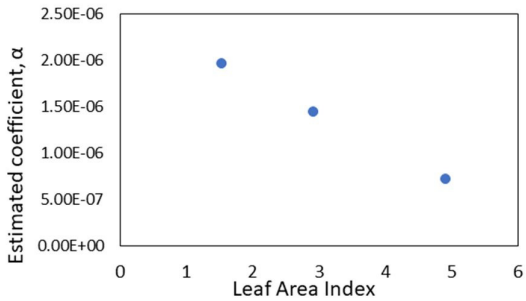
구간 내 내부 손실은 없는 것으로 가정하였다. 따라서 식물 거치 후 측정된 압력 강하 값에서 벽면 마찰에 의한 압력 손실을 고려하지 않고 식물에 의한 압력 손실로 평가하였다. 이렇게 측정된 결과를 회귀 분석하여 Darcy-Forchheimer 식과 멱법칙에 의한 계산식을 도출하는데 활용하였다.

Fig. 5는 LAI와 풍속 조건에 따른 압력 손실량을 도시하고, 이를 회귀 분석한 결과를 제시하였다. 회귀분석은 2차 함수와 거듭제곱 함수에 대해 수행하였다. 2차 함수에 의한 회귀식에서 결정계수는 0.96 – 0.99의 값을 보여 높은 설명력을 보였고, 거듭제곱 함수에 대한 회귀 분석 결과에서도 결정계수가 0.97 – 0.99를 보여 결과에 대한 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

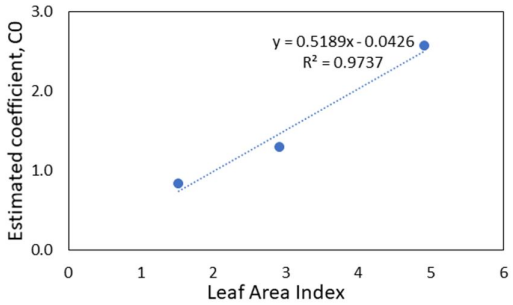
또한 위 결과를 토대로 Darcy-Forchhimer 식에 따른 공기 투과 저항성 계수(α, C_2)와 멱급수 법에 의한 계수(C_0, C_1)를 산정한 결과를 그래프로 확인하면 Fig. 6과 같이 도시할 수 있다. Fig. 6(a)에서 C_2는 내부 저항을 나타내는 인자로, LAI가 증가함에 따라 내부 저항이 상대적으로 더 크게 나타남을 알 수 있고, 결정계수 또한 1의 값을 보여 결과의 신뢰도가 있다고 판단된다. Fig. 6(b)는 공기 투과성 상수인 α를 도시한 결과이다. α는 공기 투과성 상수로 공기 유동을 제한할수록 감소하는 것이 일반적이며, 본 실험에서도 풍동 내 LAI 값이 증가하여 공기 흐름이 제한될수록 일정 비율로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 멱법칙에 의한 추정계수는 Fig. 6(c), (d)에서 보는 바



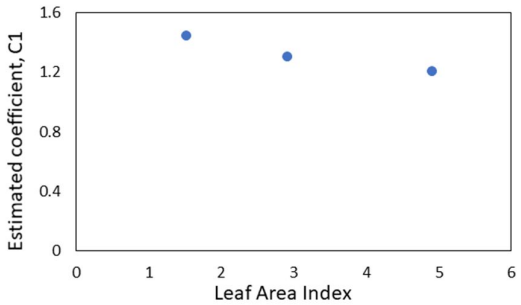
(a) C_2 value by LAI



(b) α value by LAI

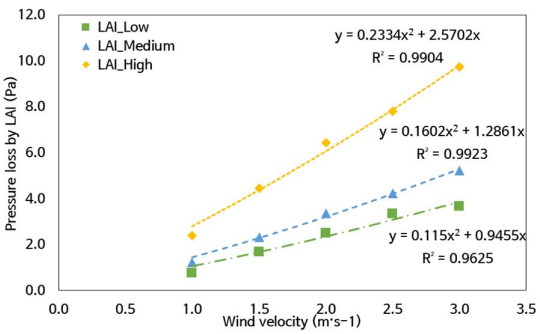


(c) C_0 value by LAI

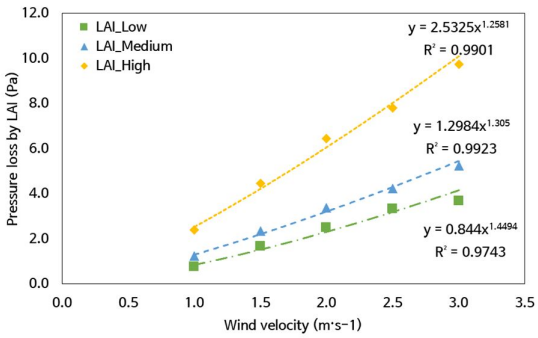


(d) C_1 value by LAI

Fig. 5. The aerodynamic coefficient according to leaf area index (LAI).



(a) Quadric equation



(b) Power law equation

Fig. 6. Estimated quadric equation and power law equation of measured pressure by regression analysis according to leaf area index (LAI).

와 같이 나타났다. Fig. 6(c)에서 C_0의 값은 LAI가 증가함에 따라 선형으로 증가하였으며, 이때 결정계수 또한 0.97로 높은 설명력을 보였다. 이와 대조적으로 Fig. 6(d)에서 보는 바와 같이 C_1 값은 LAI와 상관없이 1.2 − 1.4 수준의 값을 보이는 것으로 나타났다. 경험식에 포함된 지수인 C_1 값은 풍동 내 식물의 특성치로 추정할 수 있을 것으로 판단되고, C_0는 LAI에 따른 압력 강하 특성을 나타내는 값으로 추정할 수 있다.

본 연구를 통해 식물의 LAI가 증가함에 따라 공기 투과 저항성도 함께 증가하는 것을 정량적으로 확인하였다. 그러나 LAI가 동일 수준에 있더라도 잎의 형상, 캐노피의 크기 등에 따라 공기 투과 저항성은 다른 양상을 보일 것으로 판단되어 추가 연구를 통한 비교 평가가 요구된다.

적 요

본 연구에서는 항공살포에 의한 약액의 비산 저감을 위한 방법으로 차단 식물의 효과를 정량 평가하고자 하였다. 이에 따라 식물의 엽면적지수(LAI)에 따른 잎의 약액 부착 효율 및 공기 투과 저항성을 비산 챔버를 활용하여 측정하였다. LAI는 엽면적 밀도를 세 수준으로 구분하여 측정하였으며, 각 수준별 평균 LAI는 1.723±0.130, 2.810±0.412, 4.875±0.701로 산정되었다. 풍속 $1 m \cdot s^{-1}$에서 LAI가 'Low' 수준일 때 부착 효율 16.13%로 측정되었고, 동일 LAI 수준에서 풍속이 $2 m \cdot s^{-1}$로 증가할 때 식물의 부착 효율은 29.06%로 측정되어 1.80배 증가한 것으로 나타났다. 'Medium' 수준에서는 풍속 조건에 따라 24.42%에서 43.06%로 1.76배 증가하였다. 또한 LAI가 'High' 수준일 때 풍속의 변화에 따른 식물의 부착 효율은 1.24배 증가하는 것으로 나타나 풍속의 증가에 따라 식물의 약액 부착 효율도 함께 증가하는 경향을 보였다. 풍속 및 LAI에 따른 식물의 공기 투과 저항성 실험에서 LAI가 증가할수록 공기 투과 저항성 또한 증가하는 경향을 보였으며, 2차 함수 및 거듭제곱 함수에 대한 회귀분석 결과 결정계수가 0.96 − 0.99 수준으로 높은 설명력을 보였다. 본 연구를 통해 농경지에 인접하게 식재된 식물이 항공살포 된 약액이 비산될 때 잎에 부착 및 지면 퇴적을 유도하여 비산 저감에 효과를 나타냄을 정량 평가하였다. 또한 LAI가 증가할수록 내부 저항이 증가하는 것을 실험적으로 규명하였다. 이를 기반으로 향후 잎의 형상 및 캐노피 등 식물 특성 변수를 추가 반영하여 비산 저감 효과를 기대할 수 있는 적정 작물을 선정하는 자료가 될 것으로 사료된다.

추가 주제어 : 농약 허용물질목록 관리제도, 비산, 비의도적 농약오염, 차단식물, 항공방제

사 사

이 논문은 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2021-2484)와 한국연구재단 연구사업(과제번호: 2019R1I1A3A01055863)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사를 표합니다.

Literature Cited

Creech C.F., R.S. Henry, B.K. Fritz, and G.R. Kruger 2015, Influence of herbicide active ingredient, nozzle type, orifice size, spray pressure, and carrier volume rate on spray droplet size characteristics. Weed Technol 29:298-310. doi:10.1614/WT-D-14-00049.1

De Schampheleire M., D. Nuyttens, D. Dekeyser, P. Verboven, P. Spanoghe, W. Cornelis, D. Gabriels, and W. Steurbaut 2009, Deposition of spray drift behind border structures. Crop Prot 28:1061-1075. doi:10.1016/j.cropro.2009.08.006

Gregorio E., X. Torrent, S. Planas, and J.R. Rosell-Polo 2019, Assessment of spray drift potential reduction for hollow-cone nozzles: Part 2. LiDAR technique. Sci Total Environ 687:967-977. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.151

Guler H., H. Zhu, H.E. Ozkan, R.C. Derksen, Y. Yu, and C.R. Krause 2007, Spray characteristics and drift reduction potential with air induction and conventional flat-fan nozzles. Trans ASABE 50:745-754. doi:10.13031/2013.23129

Hewitt A.J., D.R. Johnson., J.D. Fish, C.G. Hermansky, and D.L. Valcore 2002, Development of the spray drift task force database for aerial applications. Environ Toxicol Chem 21: 648-658. doi:10.1002/etc.5620210326

Hong S.W., J.S. Park, H.N. Jeong, S.Y. Lee, L.Y. Choi, L. Zhao, and H. Zhu 2021, Fluid dynamic approaches for prediction of spray drift from ground pesticide applications: a review. Agronomy 11:1182. doi:10.3390/agronomy11061182

Jensen P.K., and M.H. Olesen 2014, Spray mass balance in pesticide application: a review. Crop Prot 61:23-31. doi: 10.1016/j.cropro.2014.03.006

Jin Y.D., H.D. Lee, Y.K. Park, J.B. Kim, and O.K. Kwon 2008. Drift and distribution properties of pesticide spray solution applied aerially by manned-helicopter. Korean J Pestic Sci 12:351-356. (in Korean)

Kim C.J., R.K. Lee, X. Yuan, M. Kim, H.J. Shin, L.S. Kim, K.S. Kyung, and H.H. Noh 2022, Residual pattern of pesticides drifted by unmanned aerial vehicle (UAV) spraying and drift reduction using maize (*Zea mays* L.). Korean J Pestic Sci 26:103-120. (in Korean) doi:10.7585/kjps.2022.26.2.103

Kim R.W., and S.W. Hong 2019, Applicability of optical particle counters for measurement of airborne pesticide spray drift. J Korean Soc Agric Eng 61:79-87. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2019.61.5.079

KOSIS 2022, Statistics KOREA Government Official Work Conference. Available via https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EB001&conn_path=I3. Accessed 20 Nov 2022.

KREI 2021, Agricultural Outlook 2021, Korea Rural Economic Institute (KREI), Naju, Korea.

Noh H.H., C.J. Kim, B.C. Moon, T.G. Kim, D. Kim, M.S. Oh, D.S. Choi, Y.Y. Kim, H.S. Song, and K.S. Kyung 2020, Drift patterns of aerial spraying pesticide caused by formulations and nozzles. Korean J Pestic Sci 24:278-285. (in Korean) doi:10.7585/kjps.2020.24.3.278

Nuyttens D., K. Baetens, M. De Schampheleire, and B. Sonck 2007, Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. Biosyst Eng 97:333-345. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001

Park J.S., S.Y. Lee, L.Y. Choi, H.N. Jeong, H.H. Noh, S.-H. Yu, H.S. Song, and S.W. Hong 2021, Analyzing drift patterns of spray booms with different nozzle types and working pressures in wind tunnel. J Korean Soc Agric Eng 63:39-47. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2021.63.5.039

Park J.S., S.Y. Lee, L.Y. Choi, S.W. Hong, H.H. Noh, and S.H. Yu 2022, Airborne-spray-drift collection efficiency of nylon screens: measurement and CFD analysis. Agronomy 12:2865 doi:10.3390/agronomy12112865

Ramsdale B.K., and C.G. Messersmith 2017, Drift-reducing nozzle effects on herbicide performance. Weed Tech 15:453-460. doi:10.1614/0890-037X(2001)015[0453:DRNEOH]2.0.CO;2.

RDA 2020, Manual of unmanned aerial vehicle for spraying pesticide. Rural Developmnet Administration(RDA), Jeonju, Korea.

Tang Q., R. Zhang, L. Chen, W. Deng, M. Xu, G. Xu, L. Li, and A. Hewitt 2020, Numerical simulation of the down wash flow field and droplet movement from an unmanned helicopter for crop spraying. Comput Electron Agric 174:105468. doi:10.1016/j.compag.2020.105468

Wang J., Y. Lan, H. Zhang, Y. Zhang, S. Wen, W. Yao, and J. Deng 2018. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions. Int J Agric Biol Eng 11:5-12. doi:10.25165/j.ijabe.20181106.4038

Zheng Y., S. Yang, X. Liu, J. Wang, T. Norton, J. Chen, and Y. Tan 2018, The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV. Front Agric Sci Eng 5:159-167. doi:10.15302/J-FASE-2018216